第 39 卷 第 5 期
2022 年 10 月

应 用 力 学 学 报
Chinese Journal of Applied Mechanics

Vol. 39 No. 5
Oct. 2022

文章编号:1000-4939(2022)05-0965-09

糯米浆改性烧料礓石灌浆材料力学性能试验研究

毛筱霏[1],张艳艳[1],胡富利[1],李献[1],陆继财[2]

(1. 西安建筑科技大学理学院,710055 西安;2. 新疆文物古迹保护中心,830000 乌鲁木齐)

摘　要:为探索出更适合土遗址裂隙加固的注浆材料,选择十分契合建筑遗址“修旧如旧”的文物修复要求的糯米浆及烧料礓石作为主要材料,设计正交试验研究 16 种配合比情况下的糯米浆液浓度、水胶比、烧料礓石掺量、外加剂和龄期对灌浆材料力学性能的影响。结果表明,在保证可灌性的前提下,灌浆材料试样的抗折、抗压强度与糯米浆液浓度及减水剂掺量呈正相关,随水胶比及膨润土掺量的增大呈现出先增大后减小的趋势。烧料礓石中含有可与糯米浆共同作用的气硬性胶凝材料和水硬性胶凝材料,对灌浆材料的抗折、抗压强度影响机理复杂,整体来看,增大烧料礓石掺量有助于提高试样的力学性能。不同配比的灌浆材料试块的抗折、抗压强度都随着龄期的增加而不断增大,龄期 7 d ~28 d 变化趋势较为显著。SEM 图像表明糯米浆改性烧料礓石注浆材料的微观结构整体呈现较多的网状结构,且附着于土颗粒表面可以较好地胶结周围土颗粒,糯米浆含有的支链淀粉树枝状结构将大量生成物规则排列,显著提高浆体成型后的密实性。运用综合平衡法得到了基于力学性能的最佳配合比为:糯米浆液浓度 6%、水胶比 0.55、减水剂掺量 2.0%、膨润土掺量 10%以及烧料礓石掺量 15%。

关键词:糯米浆液;烧料礓石;正交试验;力学性能

中图分类号:TU578　　**文献标志码**:A　　**DOI**:10.11776/j.issn.1000-4939.2022.05.019

Experimental research on the mechanical properties of glutinous rice slurry modified calcined ginger nuts grouting material

MAO Xiaofei[1], ZHANG Yanyan[1], HU Fuli[1], LI Xian[1], LU Jicai[2]

(1. School of Science, Xi'an University of Architecture and Technology, 710055 Xi'an, China,
2. Xinjiang Historic Landmarks and Sites Conservation Center, 830000 Urumqi, China)

Abstract: In order to explore more suitable grouting materials of filling the cracks in the earthen sites, glutinous rice slurry and the calcined ginger nuts, which are well-suited to the cultural relics restoration requirements of the “repair as old” of the architectural sites, were selected as the main materials. Orthogonal experiments were designed to study the influences of glutinous rice slurry concentration, water-binder ratio, calcined ginger nuts dosage, admixtures and age on the mechanical properties of grouting materials under 16 mix ratios. The results show that under the premise of ensuring the pouring ability, the flexural strength and compressive strength of the grouting material samples are positively correlated with the con-

收稿日期:2021-04-11　　**修回日期**:2022-06-06

基金项目:国家自然科学基金面上项目(No. 51878547);陕西省教育厅专项科研资助项目(No. 17JK0436)

通信作者:张艳艳。E-mail:962219266@qq.com

引用格式:毛筱霏,张艳艳,胡富利,等. 糯米浆改性烧料礓石灌浆材料力学性能试验研究[J]. 应用力学学报,2022,39(5):965-973.
MAO Xiaofei, ZHANG Yanyan, HU Fuli, et al. Experimental research on the mechanical properties of glutinous rice slurry modified calcined ginger nuts grouting material[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2022, 39(5):965-973.

centration of glutinous rice slurry and the amount of water-reducing agent, and with the increase of the water-binder ratio and the amount of bentonite, it shows a trend of increasing first and then decreasing. And the calcined ginger nuts contain air-hardening cementitious materials and hydraulic binding materials that can work together with glutinous rice slurry, which has a complicated effect on the flexural and compressive strength of the grouting material. Overall, the increase in the amount of calcined ginger nuts will help improve the mechanical properties of the samples. The flexural and compressive strengths of the grouting material test blocks under different ratios increase with the increase of age, and the trend of change is more significant at 7 d-28 d age. The SEM image shows that the microstructure of the glutinous rice slurry modified calcined ginger nuts grouting material presents a more network structure, and the material adheres to the surface of the soil particles and can better cement the surrounding soil particles. The glutinous rice slurry contains amylopectin dendritic structure that arranges a large number of products regularly and significantly improves the compactness of the slurry after forming. Using the comprehensive balance method, the best mix ratio based on mechanical properties is obtained as the glutinous rice slurry concentration is 6%, the water-binder ratio is 0.55, the water reducing agent content is 2.0%, the bentonite amount is 10%, and the calcined ginger nuts dosage is 15%.

Key words: calcined ginger nut; glutinous rice slurry; orthogonal test; mechanical property

我国西北地区存在众多保存较完好的土遗址，主要有长城、烽燧、古城、陵墓等。由于干旱少雨的气候特征，土遗址得以保存。然而，强烈的风蚀作用和集中式降雨也使得土遗址正在遭受毁灭性的破坏[1]。露天遗址的主要破坏形式为风蚀、雨蚀、根部酥碱、裂隙、坍塌等现象[2]。对于土遗址的保护主要着重于风化和裂隙两个方面，而裂隙是遗址结构性破坏的前提，遗址裂隙的加固处理是当前土遗址保护面临的最严峻的问题。考虑到土遗址的特殊性，目前主流的加固方式有化学加固、物理加固或化学和物理相结合加固，其中物理加固的主要方法是锚固法，楠竹锚杆因满足“不改变原状”、“最低限度干预”等文物保护要求，在夯土遗址加固中得到了广泛的研究和应用[3]。化学加固主要是灌浆法，近年来灌浆材料的研究取得了较多成果。

目前的裂隙注浆材料主要有化学类、水泥基类及复合材料类。化学类：高模数硅酸钾溶液(PS)在我国西北地区土遗址加固中得到了很好的应用[4]，SH(改性聚乙烯醇)和 SH 复合材料的研究也取得了较多的成果[5-6]。水泥基类：磷铝酸盐水泥基灌浆材料应用于加固存放高放射性物质粉封闭空间裂隙[7]，高性能聚合物水泥基灌浆材料加固半刚性基层道路[8]。复合材料类：聚氨酯类化学注浆材料具有较好的力学性能、黏结性能、抗腐蚀性能，但高温条件下无法使用，通过与其他材料复合可有效避免应用缺陷，聚氨酯-水玻璃复合材料[9]、聚氨酯-水泥沙浆复合材料[10]、聚氨酯-SiO_2复合材料[11]在实际工程中得到了很好的应用。然而，这些材料都无法满足文物修复中“修旧如旧，最大兼容”的基本要求，因此如何在保证力学性能、黏结性能的基础上，探索出符合文物保护要求的注浆材料至关重要。

料礓石经煅烧改性后分解出气硬性胶凝材料和水硬性胶凝材料[12]，两种胶凝材料可有效的与土体进行黏结，同时不改变文物原状。根据资料记载与考古发现，糯米浆三合土广泛应用于文物遗址中，并表现出较好的工程特性，其中包括现存的文物遗址长城所用砂浆[13]、江阴黄山小石湾炮台[14]等，其具有良好的耐久性、强度和黏接强度高以及优异的韧性、防渗性等性能，是中国建筑史上一项重要发明。

本研究采用正交试验设计对糯米浆改性烧料礓石灌浆材料的性能进行试验研究，系统地分析了糯米浆液浓度、水胶比、减水剂、膨润土以及龄期对注浆材料力学性能的影响，并通过 SEM 对试样的微观结构进行观察分析，最终确定最佳配合比。

1 试验方案

1.1 试验概况

考虑糯米浆液浓度、水胶比、减水剂掺量、膨润土掺量、烧料礓石掺量等因素，设计五因素四水平的正交试验方案，如表 1 所示。为保证浆体具有较好

的性能，前期进行大量试验确定水胶比及减水剂掺量；根据参考文献[15-17]研究结果，综合考量选取糯米浆液浓度、膨润土掺量及烧料礓石掺量。为简化分析，糯米浆液浓度、水胶比、减水剂掺量、膨润土掺量和烧料礓石掺量5种因素分别用大写字母A、B、C、D、E表示，具体如表2所示。

表1　因素水平表

Tab. 1　Factor level table

水平	糯米浆液浓度/%	水胶比	烧料礓石掺量/%	膨润土掺量/%	减水剂掺量/%
L1	0	0.45	7.5	7.5	0.5
L2	2	0.5	10	10	1
L3	4	0.55	12.5	12.5	1.5
L4	6	0.6	15	15	2

表2　正交试验配合比

Tab. 2　Orthogonal test mix ratio

配合比编号	A	B	C	D	E
1	1(0%)	1(0.45)	1(0.5%)	1(7.5%)	1(7.5%)
2	1	2(0.5)	2(1%)	2(10%)	2(10%)
3	1	3(0.55)	3(1.5%)	3(12.5%)	3(12.5%)
4	1	4(0.6)	4(2%)	4(15%)	4(15%)
5	2(2%)	1	2	3	4
6	2	2	1	4	3
7	2	3	4	1	2
8	2	4	3	2	1
9	3(4%)	1	3	4	2
10	3	2	4	3	1
11	3	3	1	2	4
12	3	4	2	1	3
13	4(6%)	1	4	2	3
14	4	2	3	1	4
15	4	3	2	4	1
16	4	4	1	3	2

糯米浆液量与胶凝材料含量成一定比例，减水剂按占胶凝材料的百分比掺加到糯米浆液之中，膨润土和烧料礓石是按照占胶凝材料的比例添加到遗址土中。按照每组配合比制作试样，养护后依次测试注浆材料试块的3 d、7 d、14 d、28 d和60 d的抗折、抗压强度；并对不同配比试样28 d龄期抗压后未受力区域样品进行扫描电镜（SEM）测试，分析试样微观结构和作用机理。

1.2　试验材料

1.2.1　糯米浆液

每次制作1 000 mL糯米浆液，称取购买糯米粉20 g、40 g、60 g、80 g放入烧杯中，再对应加入980 mL、960 mL、940 mL、920 mL水，边加热边搅拌，控制加热温度至80 ℃[18]，加热过程中保持定容，以确保所需糯米浆浓度。

1.2.2　减水剂

试验采用聚羧酸减水剂，型号为FDX RX-1-320型，减水率≥25%，推荐掺量0.5%～2%。

1.2.3　遗址土

试验选用的遗址土取自高昌故城西城墙，经现场取样，室内材性实验分析，得到3组土体物理力学参数的平均值，如表3所示。

为后续更好地进行机理分析，对遗址土进行了化学全分析和易溶盐分析。

土的化学成分是指组成土的固相、液相和气相中的化学元素、化合物的种类及其相对含量。实验依据国标《水泥化学分析方法》（GB/T 176—2017）对夯土原状土样及土坯原状土样进行化学全分析。考虑到土体间的差异较大，每个分析项目均测定3次，检测结果见表4。

参照《土工试验方法标准》（GB/T 50123—2019）对遗址土样的易溶盐成分进行分析，结果见表5。

1.2.4　膨润土

试验所用膨润土购买于湖南岳阳矿物工业用品店，颗粒大小为1 500目，材料呈碱性。

1.2.5　烧料礓石

试验选用烧料礓石为料礓石在1 000 ℃条件下煅烧得到的产物[19]，主要包括气硬性胶凝材料和水硬性胶凝材料，其具体成分及含量如表6所示。

表3　土体物理力学参数

Tab. 3　Physical and mechanical parameters of soil

土样类型	天然含水率/%	天然密度/($g\cdot cm^{-3}$)	相对密度	干密度/($g\cdot cm^{-3}$)	液限/%	塑限/%	孔隙率/%
夯土	2.70	1.90	2.66	1.85	24.1	17.2	32.6

表 4　化学全分析结果

Tab. 4　Chemical analysis results

土样编号	SiO_2/%	Al_2O_3/%	CaO/%	Fe_2O_3/%	Na_2O/%	MgO/%	K_2O/%	TiO_2/%	烧失量/%	合计/%
夯土原状土	58.30	14.16	6.53	4.72	3.14	2.35	2.06	0.52	7.04	98.90
土坯原状土	58.87	14.31	5.89	5.00	3.10	2.13	1.98	0.48	7.59	99.35

表 5　易溶盐分析结果

Tab. 5　Soluble salt analysis results

土样编号	易溶盐含量	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+
夯土原状土(含水率 2.47%)	mmol/kg	5.530	73.820	2.340	21.350	6.290	26.700	2.280
	%	0.034	0.262	0.023	0.085	0.015	0.061	0.009
土坯原状土(含水率 2.03%)	mmol/kg	4.900	11.900	2.470	1.880	1.080	12.220	1.950
	%	0.030	0.042	0.024	0.008	0.003	0.028	0.008

表 6　烧料礓石化学成分组成

Tab. 6　Chemical composition of calcined ginger nut

化学成分	相对含量/%
CaO	36.4
β-$CaSiO_3$	28.2
$Ca_2Al_2Si_2O_8$	35.4

1.3　试样制备

遗址土风干过筛后,将糯米浆液、减水剂、膨润土和烧料礓石,按照表 2 中相应配合比添加到遗址土中,利用行星式搅拌机搅拌,拌好后迅速注入到备好的 40 mm × 40 mm × 160 mm 的模具中(见图 1),并在振动台上振捣密实,待试样硬化后拆模取出并标记。在实验室自然条件下养护至 3 d、7 d、14 d、28 d、60 d 后,取出并进行抗折、抗压强度测试。每组测试均制作 3 个平行试样。



图 1　试样制备

Fig. 1　Sample preparation

1.4　试验方法及试验仪器

注浆材料试样的抗折、抗压强度检测采用微机屏显液压万能试验机进行,试验参照《水泥胶砂强度检验方法(ISO 法)》(GB/T 17671—2020)对试验的基本要求;试件尺寸均为 40 mm × 40 mm × 160 mm;抗折强度测定时,采用中心加荷法,匀速加载直至破坏,如图 2 所示。抗压强度测试时,在棱柱体侧面上进行强度测试,夹具适用试样尺寸为 40 mm × 40 mm,匀速加载直至破坏,如图 3。注浆材料试样进行抗压强度测试后,选取部分未受力的区域作为样品,为防止样品随时间增长继续发生气化和水化反应,将样品浸泡于无水乙醇中,静置 1 周时间左右,在扫描电镜测试之前,将样品取出,对其进行烘干处理,并将其制作成 1 cm^3 左右的小方块,对其表面进行喷金处理,处理完成后使用 FEI Quanta200 扫描式电子显微镜对其形貌和微观结构进行观察。



图 2　试件加载

Fig. 2　Specimen loaded

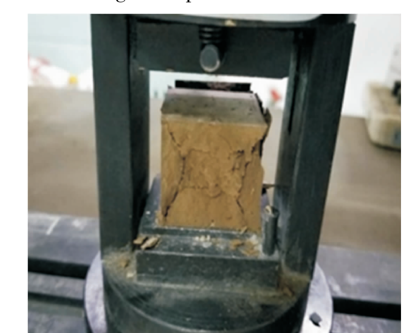


图 3　试样抗压试验破坏形态

Fig. 3　Failure modes of specimen in compressive tests

2　试验结果

2.1　改性注浆材料力学性能

2.1.1　抗折强度

如图 4 所示,各因素影响下的注浆材料随着龄期的增加均提高了注浆材料的抗折强度;普遍表现为前期增速较快,28 d 后放缓。

不同龄期的注浆材料抗折强度,大体上看,都是随糯米浆浓度不断增大,先缓慢增加,后显著增加;随水胶比的增大,龄期为 60 d 的试样的抗折强度呈现一直升高的趋势;其他龄期都呈现出先增大后减小的趋势,其中龄期为 14 d 的试样在水胶比为 0.5 时达到最大值,其他龄期在水胶比为 0.55 时达到最大值;随减水剂掺量不断增大,抗折强度逐渐增大,且变化趋势越来越显著;随着膨润土掺量的增大,该注浆材料的抗折强度普遍呈现先增大后减小的趋势,在膨润土掺量为 10.0% 时达到最大值;随着烧料礓石掺量的增加,先基本稳定或略有下降,后显著增加,最终趋于稳定。

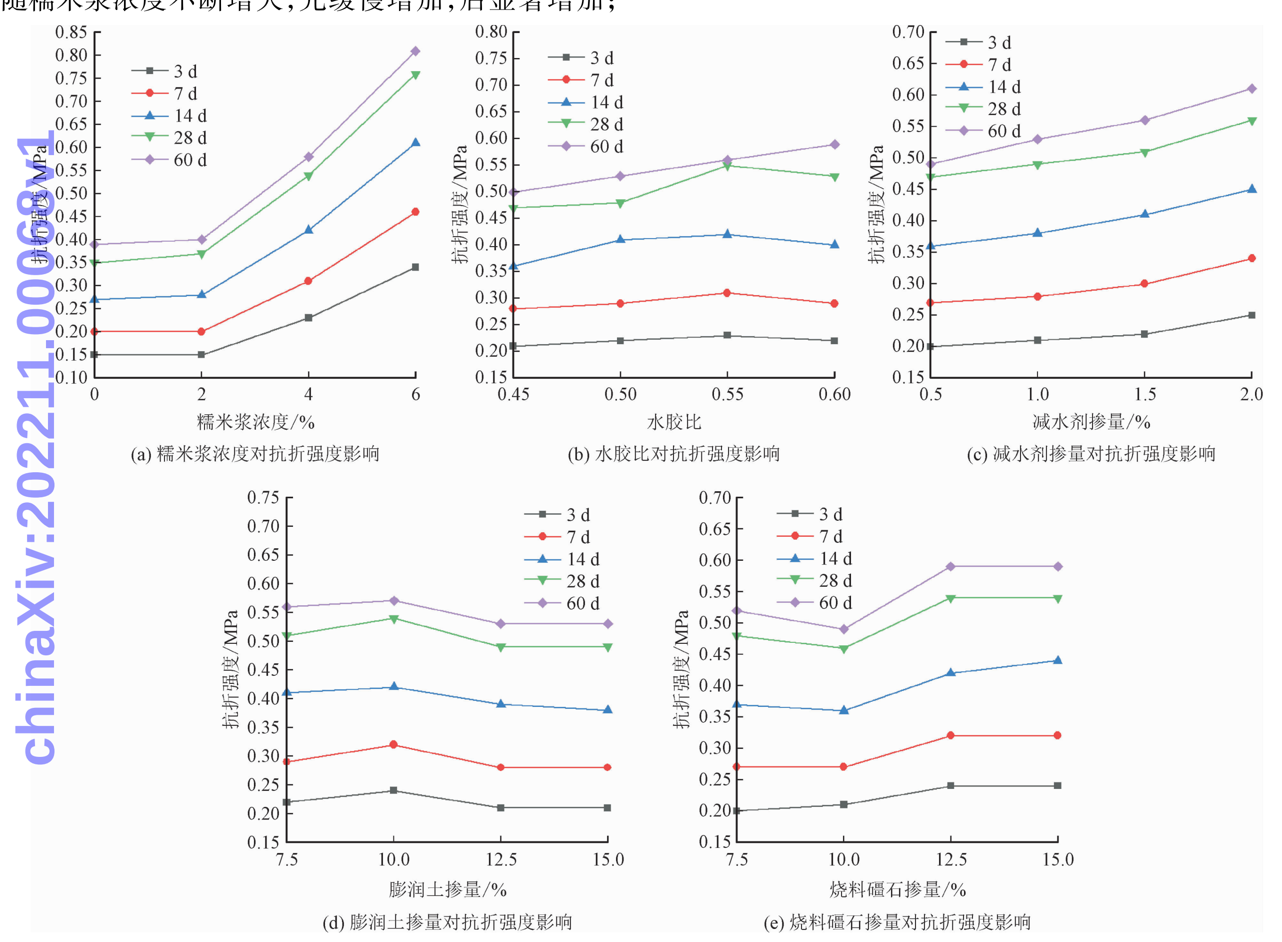


图 4　抗折强度在不同龄期受各因素影响情况

Fig. 4　The flexural strength affected by various factors at different ages

2.1.2　抗压强度

如图 5 所示,随着龄期的增加,各因素影响下的注浆材料的抗压强度都有所提高;并且,7 d、14 d 和 28 d 这 3 个梯度随龄期增大抗压强度显著提高,而在 3 d 到 7 d 及 28 d 到 60 d 这个过程中强度变化趋势较小。

各龄期的注浆材料的抗压强度,随糯米浆液浓度增大逐渐增加,且浓度由 0% 至 2% 时,抗压强度增大趋势较显著，之后随浓度增大抗压强度增大速率放缓；随着水胶比的增大，注浆材料的抗压强度先增大后减小，在水胶比为 0.55 时达到最大值；随减水剂掺量的增加，抗压强度呈现先增加后减小再增加的趋势，除龄期为 60 d 的试样在减水剂由 1.0% 增加到 1.5% 时抗压强度明显下降，其他龄期大体上呈上升趋势；随着膨润土掺量的增大，该注浆材料的抗压强度普遍呈现先增大后减小的趋

势，其中，龄期为 60 d 的试样转折点在掺量为 12.5% 时，其他龄期转折点均在 10% 时；随着烧料礓石掺量增大，抗压强度大体呈现先增加后减小再增加的趋势，除 3 d 以外，其他龄期的试样在烧料礓石掺量从 10.0% 到 12.5% 时抗压强度都有明显下降。

(a) 糯米浆浓度对抗压强度影响

(b) 水胶比对抗压强度影响

(c) 减水剂掺量对抗压强度影响

(d) 膨润土掺量对抗压强度影响

(e) 烧料礓石掺量对抗压强度影响

图 5　抗压强度在不同龄期受各因素影响情况

Fig. 5　The compressive strength affected by various factors at different ages

2.2　改性注浆材料作用效应及微观结构

2.2.1　生成物主要成分

由图 6 所示，糯米浆和烧料礓石改性遗址土注浆材料的产物表现出多样化特征。其中，较完整的结构为块状土体颗粒，在其周围黏附有较多的糯米浆规则排列的水化产物[20]；树枝状结构的为水化硅铝酸钙凝胶(C-S-H)和糯米浆液调控 $CaCO_3$ 生成物，大量黏聚在土颗粒周围且将周围土颗粒紧密联系在一起；针状结构物为水硬性胶凝材料生成物晶化表现，可以发现在土颗粒较小的孔隙中分布较多，且大都呈现错乱的分布状态，可以填补孔隙，提高土体的密实性[15,21]。糯米浆和烧料礓石改性土体注浆材料的微观结构整体形成较多的网状结构，且附着于土颗粒表面胶结周围土颗粒，水硬性胶凝材料水化产物填充土颗粒间较小孔隙，使整体结构密实性提高，糯米浆支链淀粉的树枝状结构将大量的生成物规则排列可进一步提高注浆材料的力学性能。

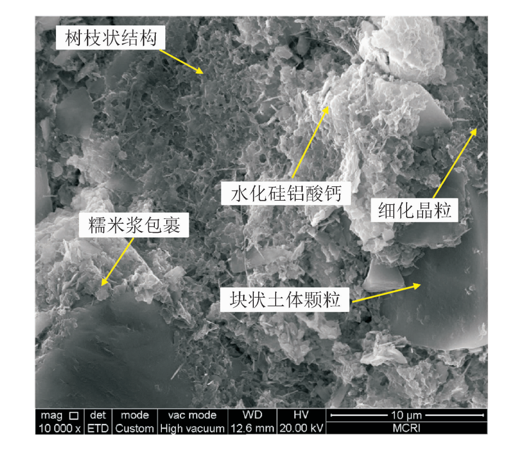


图 6　糯米浆和烧料礓石拌合遗址土注浆材料 SEM 图

Fig. 6　SEM of glutinous rice slurry and calcined ginger nuts admixed by soil

2.2.2 糯米浆和烧料礓石对土颗粒作用的微观结构

如图 7 所示,图 7(a) ~7(c)为未加糯米浆液注浆材料 28 d 的扫描电镜图,图中显示,该注浆材料的土颗粒黏结松散,颗粒间孔隙较多,内部存在缺陷较多,孔隙处胶结产物较少,未形成有效的填充和连接作用,对该注浆材料宏观力学性能不利。图 7(d) ~7(f)为 6% 浓度糯米浆液注浆材料龄期 28 d 的扫描电镜图,从图中可以看出,与未加糯米浆液的注浆材料微观结构相比,胶结产物增多,微观裂缝有所减少,结构致密性提高。

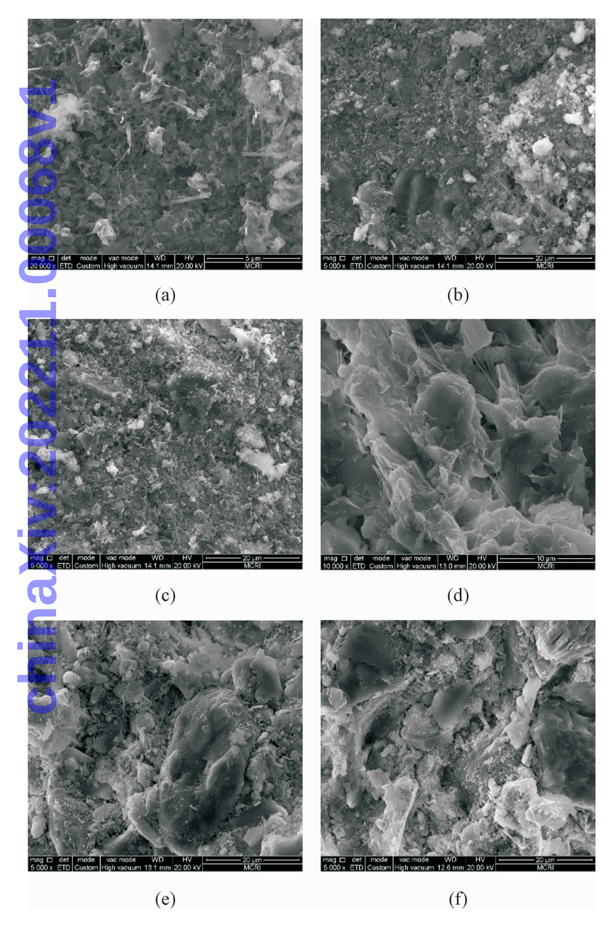


图 7　空白样注浆材料与糯米浆注浆材料的 SEM 图

Fig. 7　SEM of blank sample grouting material and glutinous rice grouting material

2.3 最佳配合比

如表 7,基于该注浆材料 28 d 龄期的抗折、抗压强度,采用综合平衡法分析,提出注浆材料的建议最佳配合比为:糯米浆液浓度 6%、水胶比 0.55、减水剂掺量 2.0%、膨润土掺量 10%、烧料礓石掺量 15%。

表 7　配合比的综合平衡分析表

Tab. 7　The comprehensive balance analysis of the mix ratio

性能指标		A	B	C	D	E
抗折强度/MPa	极差	0.41	0.07	0.10	0.05	0.08
	最佳配合比	A4	B3	C4	D2	E4
抗压强度/MPa	极差	0.64	0.12	0.15	0.14	0.27
	最佳配合比	A4	B3	C4	D2	E4

3 机理分析

糯米的主要成分为支链淀粉,糯米粉加热糊化后,支链淀粉分子中的链条变得松散不规则[22],加上支链淀粉含有上千个葡萄糖残基,分子量较大,故具有较高的黏性。伴随着糯米浆浓度的增大,产生的黏结作用增强,较高的黏性使材料颗粒之间牢固结合。随着养护龄期的增加,糯米浆在材料颗粒之间形成的生物框架越牢固,侧面证实了古建筑糯米灰浆类胶凝材料随时间增长强度变大的原因。

在一定范围内,随着水胶比的增大,烧料礓石所含水硬性胶凝材料完成水化反应程度变大,水化反应产物增多,提高了颗粒之间的黏结强度,试样的密实度随之增大,试样整体力学性能得到提升;而当水胶比超过一定值时,水化反应所需水量消耗掉之后,剩余的水分增大了材料颗粒的不定向性,当浆体中含有的自由水过多时,会使注浆材料产生泌水等现象,土颗粒间孔隙水会增多,使材料成型之后形成较多的孔隙,试样不密实,进而试样的抗折、抗压强度减弱。故在保证注浆材料流动性和收缩性的基础上,合理选择水胶比对材料强度有较大的影响。

随着减水剂掺量的增大,该注浆材料中含有的自由水含量降低,注浆材料试样成型和后期养护过程中,内部结构所形成的气孔和裂缝数量减少,试样密实性得到提高,有效提高试样的抗折、抗压强度。

膨润土含有大量的蒙脱石成分,自保水性能较好,同时具有一定吸附性,可以增强界面间的黏结性能,提高稳定性;由于膨润土具有一定的润滑性能,可改善浆体的和易性,适量的膨润土在注浆材料搅拌过程中出现悬浮材料颗粒,使材料有良好的均匀性,减少试样成型后的孔隙和裂缝;当膨润土含量较大时,由于其膨胀性,导致材料内部所产生的骨架空隙变大,残留水分较多,试样成型后,内部会产生气孔和裂缝,导致试样力学强度降低。

烧料礓石含有气硬性胶凝材料和水硬性胶凝材料,可分别与糯米浆共同作用改性遗址土,烧料礓石掺量对抗折、抗压强度的影响过程较复杂。

气硬性胶凝材料和糯米浆对遗址土的作用效应分析[12,23]:气硬性胶凝材料所含成分主要为 CaO 和 $Ca(OH)_2$,遗址土颗粒中加入该材料后,与空气中的 CO_2 反应生成 $CaCO_3$ 晶体,对土颗粒有胶结作用;同时 $CaCO_3$ 晶体在土体中可以形成网格,胶结土颗粒时可以产生框架作用,使土颗粒能够形成一个整体,增大土颗粒分布排列规则性,进而提高土体强度;糯米浆含有大量的支链淀粉,糊化后具有较强的黏结性能,且在上述 $CaCO_3$ 形成的过程中具有一定的调控作用,同时树枝状的支链淀粉可以为 Ca^{2+} 提供配位点,促使土体中的 SiO_2 和 Al_2O_3 与 Ca^{2+} 反应生成水化硅铝酸钙(C-S-H),同时也按照树枝状结构进行紧密排列,形成树枝状框架更好地包裹土颗粒。糯米浆与 $CaCO_3$ 晶体的共同作用,使包裹的土体颗粒更加密实,提高土体的强度。其中生成 $CaCO_3$ 晶体和水化硅铝酸钙(C-S-H)的反应表达式如下。

$$Ca(OH)_2 + CO_2 = CaCO_3 + H_2O$$

$$Ca^{2+} + (SiO_2、Al_2O_3) \longrightarrow C-S-H$$

水硬性胶凝材料和糯米浆对遗址土的作用效应分析[24-25]:料礓石煅烧后产生的水硬性胶凝材料与土颗粒拌合后,形成水泥基胶凝材料,该水泥基胶凝材料颗粒小,黏结性大,与土颗粒充分接触,包围在土颗粒表面,并与临近的土颗粒黏结在一起,形成较大的黏结块,起到封闭土颗粒空隙的作用;水硬性胶凝材料加入到土体中,与土颗粒发生化学反应生成新的胶结体,作为一种新的胶结材料在土颗粒之间发挥黏结作用;部分流动性较好的胶凝材料填充在颗粒间的微小孔隙中,填充孔隙的同时,产生的黏结作用更好地使土颗粒形成一个整体,提高土体的密实性,改善土体力学性能。

4 结 论

通过对 16 种不同配比糯米浆改性烧料礓石灌浆材料力学性能测试及微观结构分析,可以得到如下结论。

1)不同配比的灌浆材料试样随龄期的增大,抗折、抗压强度都不断提高。抗折强度在龄期为 28 d 之前变化显著,28 d 至 60 d 时增长缓慢。抗压强度在龄期为 7 d 至龄期为 28 d 过程中增速较快,而在龄期在 3 d ~7 d 和 28 d ~60 d 这两个阶段的增速较慢。

2)在保证可灌性的前提下,灌浆材料试样的抗折、抗压强度,随糯米浆液浓度及减水剂掺量的增大而不断增大,随水胶比及膨润土掺量的增大呈现出先增大后减小的趋势;而烧料礓石掺量的增大使得试样的抗折强度先平稳再增大最后又趋于平稳,使得试样的抗压强度先增大再减小再增大的趋势,但整体来看,曲线呈上升趋势。

3)由生成物的成分分析和扫描电镜测试可知,糯米浆可以较好地胶结土体颗粒,填充颗粒间较小孔隙;并且糯米浆利用所含有的支链淀粉树枝状结构的特点,将 $CaCO_3$ 和水化产物按树枝状规则排列,更好地包裹土体颗粒,显著提高浆体成型后的密实性,改善注浆材料的微观结构,增强其力学宏观性能。

4)基于综合平衡法分析注浆材料测试结果,确定力学性能的建议最佳配比为:糯米浆液浓度 6%、水胶比 0.55、减水剂掺量 2.0%、膨润土掺量 10%以及烧料礓石掺量 15%。

参考文献:

[1] 赵治瑞. 西北干旱地区土遗址保护加固工程的影响因素研究——以骆驼城遗址加固工程为例[J]. 遗产与保护研究,2017,2(4):175-177.
ZHAO Zhirui. Study on the factors affecting the reinforcement project of Camel City site[J]. Research on heritages and preservation, 2017,2(4):175-177(in Chinese).

[2] 孙满利,李最雄,王旭东,等. 交河故城的主要病害分析[J]. 敦煌研究,2005(5):97-99,129.
SUN Manli, LI Zuixiong, WANG Xudong, et al. The characteristic of primary damages about the ruins of the ancient city Jiaohe[J]. Dunhuang research,2005(5):97-99,129(in Chinese).

[3] 毛筱霏,胡富利,王茜,等. 夯筑遗址加固中楠竹锚杆应力分布变化规律研究[J]. 应用力学学报,2021,38(1):345-353.
MAO Xiaofei, HU Fuli, WANG Xi, et al. Study on the stress distribution of Nanzhu bolt in the consolidation of ramming site[J]. Chinese journal of applied mechanics,2021,38(1):345-353(in Chinese).

[4] 和法国,谌文武,张景科,等. 交河故城 41—3 亚区崖体裂隙注浆研究[J]. 敦煌研究,2008(6):23-28.
HE Faguo, CHEN Wenwu, ZHANG Jingke, et al. The research of cliff crack grouting in 41-3 sub-region in Jiaohe Ruins[J]. Dunhuang research,2008(6):23-28(in Chinese).

[5] 谌文武,刘建,龚书亚,等. 土遗址裂隙注浆用 SH-(C+F+CAO)浆液耐久性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2016,35(增刊2):4310-4317.
CHEN Wenwu, LIU Jian, GONG Shuya, et al. Researches on the durability of the SH-(C+F+CAO) slurry applied to reinforce the cracks in earthen sites[J]. Chinese journal of rock mechanics and

engineering,2016,35(S2):4310-4317(in Chinese).

[6] 谌文武,刘建,崔凯,等. 土遗址裂隙注浆材料 PS-(C+F)与 SH-(C+F)性能对比研究[J]. 文物保护与考古科学,2017,29(5):70-76.
CHEN Wenwu,LIU Jian,CUI Kai,et al. The comparative study to performance of the earthen sites fissure grouting material PS-(C+F) and SH-(C+F)[J]. Sciences of conservation & archaeology,2017,29(5):70-76(in Chinese).

[7] 杨蓉,李相国,刘卓霖,等. 磷铝酸盐水泥基灌浆材料流变性能及保水性能[J]. 硅酸盐通报,2017,36(6):2043-2048.
YANG Rong,LI Xiangguo,LIU Zhuolin,et al. Rheological property and water retention property of aluminophosphate cement-based grouting material[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society,2017,36(6):2043-2048(in Chinese).

[8] 豆莹莹,李晓民,魏定邦. 高性能聚合物水泥基灌浆材料设计及性能验证[J]. 硅酸盐通报,2019,38(5):1448-1455.
DOU Yingying,LI Xiaomin,WEI Dingbang. Design and performance verification of high-performance polymer cement-based grouting materials[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society,2019,38(5):1448-1455(in Chinese).

[9] 刘玄,杨政鹏,管学茂,等. 聚醚基聚氨酯/水玻璃凝胶的制备及性能[J]. 化工新型材料,2015,43(7):224-226.
LIU Xuan,YANG Zhengpeng,GUAN Xuemao,et al. Preparation and property of the polyurethane/silicate gel based on polyether glycol[J]. New chemical materials,2015,43(7):224-226 (in Chinese).

[10] 王传勇,夏茹,钱家盛. 双组份聚氨酯/水泥注浆加固材料的性能研究[J]. 广东化工,2015,42(17):27-28.
WANG Chuanyong,XIA Ru,QIAN Jiasheng. Research on property of two-component polyurethane/cement grouting reinforcement material[J]. Guangdong chemical industry,2015,42(17):27-28(in Chinese).

[11] XIANG X J,QIAN J W,YANG W Y,et al. Synthesis and properties of nanosilica-reinforced polyurethane for grouting[J]. Journal of applied polymer science,2006,100(6):4333-4337.

[12] 赵林毅,李黎,李最雄,等. 中国古代建筑中两种传统硅酸盐材料的研究[J]. 无机材料学报,2011,26(12):1327-1334.
ZHAO Linyi,LI Li,LI Zuixiong,et al. Research on two traditional silicate materials in China's ancient building[J]. Journal of inorganic materials,2011,26(12):1327-1334(in Chinese).

[13] XIAO Y,FU X,GU H,et al. Properties,characterization,and decay of sticky rice-lime mortars from the Wugang Ming dynasty city wall (China)[J]. Materials characterization,2014,90(4):164-172.

[14] 张慧,万俐. 江阴黄山小石湾炮台遗址修复用灰土最佳配方筛选研究[J]. 文物保护与考古科学,2010,22(2):23-26.
ZHANG Hui,WAN Li. Research on the optimal formula of "lime-soil" for restoration of the Xiaoshi harbor fort site at Huangshan,Jiangyin[J]. Sciences of conservation and archaeology,2010,22(2):23-26(in Chinese).

[15] 张景科,王南,樊孟,等. 烧料礓石改性遗址土裂隙注浆材料龄期性能试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2018,37(1):220-229.
ZHANG Jingke,WANG Nan,FAN Meng,et al. Experimental study on age properties of fissure grouting material composed of calcined ginger nuts and earthen site soil[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering,2018,37(1):220-229(in Chinese).

[16] 胡鹏,张燕,夏飞宇,等. 糯米对氯氧镁水泥的改性作用[J]. 广州化工,2015,43(22):61-62.
HU Peng,ZHANG Yan,XIA Feiyu,et al. Research on modification effects of glutinous rice on magnesium oxychloride cement[J]. Guangzhou chemical industry,2015,43(22):61-62(in Chinese).

[17] 马晨峰. 膨润土-PVA 纤维水泥基复合材料力学性能研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2019.

[18] 赵林毅. 应用于岩土质文物保护加固的两种传统材料的改性研究[D]. 兰州:兰州大学,2012.

[19] 谌文武,张起勇,刘宏伟,等. 糯米浆温度对糯米灰浆加固遗址土的影响[J]. 岩石力学与工程学报,2017,36(增刊 2):4244-4250.
CHEN Wenwu,ZHANG Qiyong,LIU Hongwei,et al. Influence of temperature on glutinous rice slurry strengthening site soil by sticky rice-lime mortar[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering,2017,36(S2):4244-4250(in Chinese).

[20] 贾栋钦,裴向军,张晓超,等. 改性糯米灰浆固化黄土的微观机理试验研究[J]. 水文地质工程地质,2019,46 (6):94-100.
JIA Dongqin,PEI Xiangjun,ZHANG Xiaochao,et al. A test study of the microscopic mechanism of modified glutinous rice mortar solidified loess[J]. Hydrogeology & engineering geology,2019,46(6):94-100(in Chinese).

[21] 陈卫昌,王思敬,李黎,等. 改性料礓石力学性质试验[J]. 岩土力学,2018,39(5):1796-1804.
CHEN Weichang,WANG Sijing,LI Li,et al. Test on mechanical characteristics of modified ginger nut[J]. Rock and soil mechanics,2018,39(5):1796-1804(in Chinese).

[22] 范明明,裴向军,杜杰,等. 改性糯米灰浆基本物理力学特性及微观结构试验研究[J]. 硅酸盐通报,2020,39(5):212-218.
FAN Mingming,PEI Xiangjun,DU Jie,et al. Experimental study on basic physical and mechanical properties and microstructure of modified glutinous rice mortar[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society,2020,39 (5):212-218(in Chinese).

[23] 李黎,赵林毅. 中国古代石灰类材料研究[M]. 北京:文物出版社,2015:95-98.

[24] 李黎,赵林毅,王金华,等. 我国古代建筑中两种传统硅酸盐材料的物理力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报,2011,30(10): 2120-2127.
LI Li,ZHAO Linyi,WANG Jinhua,et al. Research on physical and mechanical characteristics of two traditional silicate materials in Chinese ancient buildings[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering,2011,30(10):2120-2127(in Chinese).

[25] ELTURKI A,BALL R J,ALLEN C. The influence of relative humidity on structural and chemical changes during carbonation of hydraulic lime[J]. Cement and concrete research,2007,37(8):1233-1240.

（编辑　李坤璐）